

Vyacheslav V. Gulvanskiy – Master's Degree in Engineering and Technology in Engineering System Management (2015), postgraduate student of the Department of Automation and Control Processes of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication; digital signal processing.

E-mail: vgulvanskiy@gmail.com

Ivan I. Kanatov – Ph.D. in Engineering (1974), Associate Professor (1980) of the Department of Automation and Control Processes of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: mathematical system theory; digital signal processing.

E-mail: iikanatov@etu.ru

Dmitry M. Klionskiy – Ph.D. in Engineering (2013), Associate Professor of the Department of Software and Computer Application of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: wavelet-analysis; spectral analysis; MATLAB modeling.

E-mail: klion2003@list.ru

Vladimir F. Lapizkiy – Ph.D. in Engineering (2000), Associate Professor (2001). Head of the Department for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: lvf333@ya.ru

Vadim I. Bobrovskiy – D.Sc. in Engineering (2009), Associate Professor (2010), Head of Department of PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of 139 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: v.bobrovskiy@ntcl.inteltech.ru

Konstantin V. Frolov – Master's Degree in Digital, Microwave and Optical Communication Systems (2016) of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". 2nd Class Engineer for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

Aleksei K. Skvortov – Engineer in Multichannel Telecommunication Systems (2010, Military Academy of Communications (Saint-Petersburg)). 2nd Class Engineer for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

УДК 621.396.62

С. В. Дворников, А. В. Пшеничников
Военная академия связи (Санкт-Петербург)

Помехозащищенная модель радиолинии в условиях динамического преднамеренного воздействия

Проанализирована эффективность известных режимов функционирования радиолинии в условиях динамического воздействия. На основе полученных результатов обоснована актуальность синтеза помехозащищенных моделей функционирования радиолинии. Сформулирована цель исследования, для достижения которой введено понятие стратегии управления ресурсами радиолинии. Заданы ограничения на параметры преднамеренного воздействия. На основе теории случайных процессов получена модель радиолинии при динамическом преднамеренном воздействии.

Помехозащищенность, метод управления, модель радиолинии, преднамеренное воздействие, оценка эффективности

Обеспечение эффективности линий радиосвязи было и остается приоритетным на всех этапах построения объединенной автоматизированной цифровой сети связи [1]. Учитывая темпы роста возможностей радиотехники, весьма актуальным является обеспечение помехозащищенности и пропускной способности современной сети радиосвязи.

Методы повышения помехозащищенности линий радиосвязи представлены в работах [2]–[5]. Предложенные решения основываются на увеличении базы сигнала с использованием различных технологий. Вопросы повышения пропускной способности линий радиосвязи нашли отражение в работах [6]–[12], в которых на основе методов

теории связи получены помехоустойчивые сигнальные конструкции.

Необходимо заметить, что разработанный методический аппарат применим к достаточно узкому классу внешних воздействий, так как предполагает стационарность внешней среды. Кроме того, при разработке методик не учитывались когнитивные свойства системы противодействия, проявляющиеся в динамическом изменении параметров воздействия на радиолинию, которое определим как динамическое преднамеренное воздействие. Для обоснования сделанного вывода проведем обобщенную оценку эффективности воздействия комплекса противодействия на радиолинию, функционирующую на группе частот.

Введем следующие допущения относительно системы противодействия. Предположим, что в информационной базе имеются данные об используемых в радиолинии сигнальных конструкциях, а также расположении источников радиоизлучения. Постановка преднамеренных помех осуществляется по отношению к одной сигнальной конструкции при условии достаточного энергетического ресурса, а алгоритмы функционирования комплекса противодействия позволяют динамически изменять режимы его функционирования. Подсистема радиоразведки обладает достаточной мощностью для выявления группы выделенных частот.

В отношении радиолинии положим, что для ее функционирования выделено m рабочих частот. Энергетические ресурсы радиолинии соизмеримы с ресурсами комплекса противодействия. В радиолинии применяется метод группового использования частот, реализованный различными современными режимами функционирования радиолиний [2]–[4], [13], [14].

С учетом сделанных допущений и ограничений задача системы противодействия сводится к

выявлению факта излучения на рабочих частотах и оптимального распределения своего энергетического ресурса. Необходимо отметить, что задачи распределения ресурсов достаточно точно формализуются методами исследования операций [15]. Будем полагать, что их решения являются основой синтеза функциональных моделей системы противодействия, реализующего принципы динамического изменения воздействия.

В этих условиях наибольший интерес представляет оценка среднего времени реакции системы противодействия, под которым будем понимать временной интервал от начала функционирования радиолинии до постановки преднамеренных помех. Заметим, что система введенных допущений несколько обобщает функциональную модель деструктивного воздействия. Вместе с тем она позволяет получить обобщенную оценку эффективности современных режимов функционирования радиолиний.

В заданных ограничениях среднее время реакции определим как среднее время реакции для рабочей частоты \bar{t}_{pi} , $i = \overline{1, m}$. Для определения данного параметра будем полагать, что обнаружение рабочей частоты радиолинии возможно при одновременном выполнении трех условий: наличии радиоизлучения, электромагнитной доступности и временного контакта приемника поиска системы противодействия с радиоизлучением.

На рис. 1 приведена модель поиска радиоизлучения на i -й рабочей частоте, $i = \overline{1, m}$.

Наличие излучения на i -й рабочей частоте представим случайным импульсным потоком со средним временем излучения $\bar{t}_{излi}$ и средним временем паузы $\bar{t}_{пi}$. Электромагнитную доступность (ЭМД) этого излучения аналогично пред-

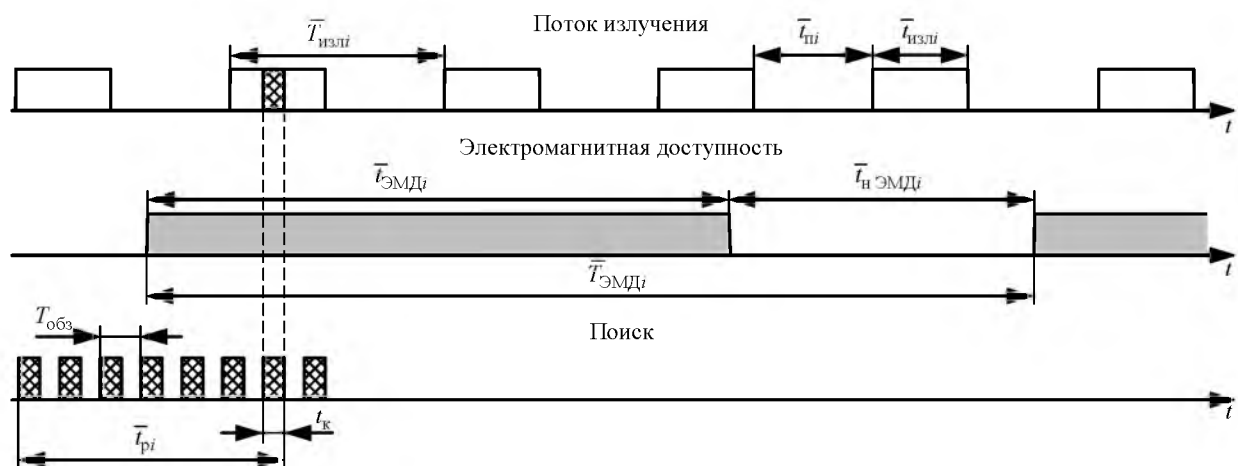


Рис. 1

ставим случайным импульсным потоком со средним временем электромагнитной доступности $\bar{t}_{ЭМДi}$ и временем электромагнитной недоступности $\bar{t}_{н ЭМДi}$.

При последовательном обзоре полосы частот анализ i -й рабочей частоты представим детерминированным импульсным потоком с периодом обзора $T_{обз}$ и временем контакта t_k . Предположим, что для обнаружения факта излучения при его наличии и электромагнитной доступности необходимо $t_k \ll \bar{t}_{излi}$.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{излi} &= 1/\bar{T}_{излi} = 1/(\bar{t}_{излi} + \bar{t}_{нi}); \\ \gamma_{t_i} &= \bar{t}_{излi}/(\bar{t}_{излi} + \bar{t}_{нi}) = \bar{F}_{излi} \bar{t}_{излi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из определения вероятности случайного события следует:

$$P_{ЭМДi} = \bar{t}_{ЭМДi}/(\bar{t}_{ЭМДi} + \bar{t}_{н ЭМДi}) = \bar{F}_{ЭМДi} \bar{t}_{ЭМДi}.$$

Среднее время реакции \bar{t}_{pi} определим с использованием элементов теории случайных импульсных потоков [16]:

$$\bar{t}_{pi} = \bar{t}_{совпi} = \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{\bar{t}_n} \right)^{-1} \left(\frac{1}{\prod_{n=1}^N \bar{F}_n \bar{t}_n} - 1 \right),$$

где $\bar{t}_{совпi}$ – среднее время совпадения i -х потоков излучения ($n=1$) и доступности ($n=2$); \bar{F}_n , \bar{t}_n – средняя частота и средняя длительность n -го потока соответственно.

Для представленной на рис. 1 модели без учета последовательного обзора ($N=2$) имеем:

$$\begin{aligned} \bar{t}_{совпi} &= \left(\frac{1}{\bar{t}_{излi}} + \frac{1}{\bar{t}_{ЭМДi}} \right)^{-1} \times \\ &\times \left(\frac{1}{\bar{F}_{ЭМДi} \bar{t}_{ЭМДi} \bar{F}_{излi} \bar{t}_{излi}} - 1 \right). \end{aligned}$$

С учетом детерминированного потока последовательного обзора полосы частот (рис. 1):

$$\begin{aligned} \bar{t}_{совпi} = \bar{t}_{pi} &= \left(\frac{1}{\bar{t}_{излi}} + \frac{1}{\bar{t}_{ЭМДi}} \right)^{-1} \times \\ &\times \left(\frac{1}{\bar{F}_{ЭМДi} \bar{t}_{ЭМДi} \bar{F}_{излi} \bar{t}_{излi}} - 1 \right) + t_k. \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая (1) преобразуем (2):

$$\bar{t}_{pi} = \frac{\bar{t}_{излi} \bar{t}_{ЭМДi}}{\bar{t}_{ЭМДi} + \bar{t}_{излi}} \left(\frac{1}{P_{ЭМДi} \gamma_{t_i}} - 1 \right) + t_k. \quad (3)$$

Для упрощения (3) предположим, что время работы радиолинии на одной частоте фиксировано: $\bar{t}_{излi} = t_\phi$. Тогда с учетом (1) окончательно получим:

$$\bar{t}_{pi} = \frac{t_\phi \bar{t}_{ЭМДi}}{\bar{t}_{ЭМДi} + t_\phi} \left(\frac{T}{P_{ЭМДi} t_\phi} - 1 \right) + t_k, \quad (4)$$

где T – период программной перестройки рабочей частоты при работе радиолинии на нескольких частотах.

На рис. 2 представлены результаты аналитического моделирования с использованием выражения (4). В качестве исходных данных предполагалось, что $t_k = 2$ мс, $\bar{t}_{ЭМДi} = 180$ с.

Из анализа результатов следует, что при функционировании радиолинии на одной частоте или в адаптивных режимах на группе частот, характеризующимся отношением $t_\phi/T = 1$, преднамеренное воздействие на ее ресурсы будет оказано за время, не превышающее 0.1 с. При функционировании радиолинии в режиме программной перестройки рабочей частоты на 1000 частотах и произвольном законе использования частот $t_\phi/T = 0.001$ и время реакции системы противодействия возрастет до 10 с.

Проведенная оценка эффективности системы противодействия носит обобщенный характер. Однако она наглядно показывает, что существующие алгоритмы функционирования радиолиний в своей совокупности не обеспечивают их эффективное функционирование в условиях динамически изменяющейся конфликтной ситуации. Следовательно, разработка моделей и методов помехозащиты радиолиний в этих условиях является достаточно актуальной проблемой. В настоящей статье представлен один из подходов к решению указанного класса задач, основанный на теории случайных процессов

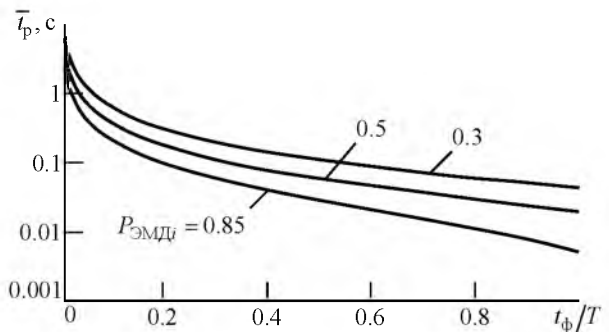


Рис. 2

и понятия коэффициентов использования элементарных методов управления.

Для дальнейших рассуждений введем следующие понятия. Под стратегией управления радиолинией будем понимать совокупность элементарных методов управления. А элементарным методом управления будем считать совокупность способов, направленных на достижение требуемого значения эффективности функционирования радиолинии. Отличительными свойствами элементарных методов управления являются их дальнейшая неделимость, системность при формировании стратегии управления. Под системностью элементарных методов управления будем понимать их структурно-функциональную взаимосвязанность, учитывая, что некоррелированные элементарные методы управления образуют отдельные стратегии управления.

Примерами элементарных методов управления ресурсами радиолинии являются ее функционирование на фиксированной частоте, частотно-адаптивный режим, режим программной перестройки рабочей частоты на выделенных частотах и др. [16]. В настоящей статье положим элементарные методы управления известными. В такой постановке целью является разработка стратегии управления ресурсами радиолинии в условиях изменяющегося деструктивного воздействия.

Стратегии управления ресурсами определим коэффициентами использования элементарных методов управления радиолинией α и системы противодействия β . Для этого введем понятия векторов использования элементарных методов управления ресурсами радиолинии и системы противодействия.

Предположим, что система управления ресурсами радиолинии использует $l = 2, 3, \dots, L$ элементарных методов управления. Тогда под коэффициентом использования j -го элементарного метода будем понимать отношение суммарного временного интервала использования элементарного метода $\tau_{\Sigma j}$ к периоду оценки $T_{\text{оц}}$:

$$\alpha_j = \tau_{\Sigma j} / T_{\text{оц}}.$$

На временном промежутке $T_{\text{оц}}$ стратегии управления ресурсами радиолинии и системы противодействия остаются неизменными. Коэффициенты α_i образуют вектор использования элементарных методов системой управления ресурсами радиолинии:

$$\mathbf{A} = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_L). \quad (5)$$

Необходимо отметить, что выражение (5) определяет значения вектора коэффициентов использования элементарных методов в частном случае при условии стационарного воздействия. В общем случае в условиях динамического воздействия вектор \mathbf{A} зависит от времени:

$$\mathbf{A}(t) = [\alpha_1(t) \ \alpha_2(t) \ \dots \ \alpha_L(t)].$$

Аналогичным образом определим вектор использования элементарных методов управления системой противодействия $\mathbf{B}(t)$.

Нахождение элементов вектора $\mathbf{A}(t)$, определяющего стратегию управления ресурсами радиолинии, в общем случае является нетривиальной задачей, требующей формализации для различных условий внешнего воздействия. Приведем решение данной задачи для случая, когда совокупность элементарных методов воздействия системы противодействия образует простейший поток. При условии, что каждому элементарному методу управления ресурсами радиолинии соответствует единственный метод преднамеренного воздействия, поток элементарных методов управления ресурсами радиолинии с достаточной точностью также можно полагать простейшим.

При этом должны выполняться следующие условия:

- число используемых элементарных методов управления за расчетный интервал времени должно не зависеть от конкретного временного интервала и определяться только длиной последнего (свойство стационарности);

- в каждый текущий момент времени используется только один элементарный метод управления (свойство ординарности);

- количество элементарных методов управления за конкретный интервал времени не зависит от того, сколько элементарных методов используется на других интервалах (отсутствие последствия, что практически означает отсутствие корреляционных связей между элементарными методами управления).

В рамках сделанных ограничений представим модель радиолинии в виде непрерывной цепи Маркова. Тогда вероятности состояний определим коэффициентами использования элементарных методов управления:

$$\alpha_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_j(t), \quad j = \overline{1, L}. \quad (6)$$

Для выполнения условия (6) необходимо, чтобы все существенные состояния модели были связанными. Пример такой модели радиолинии

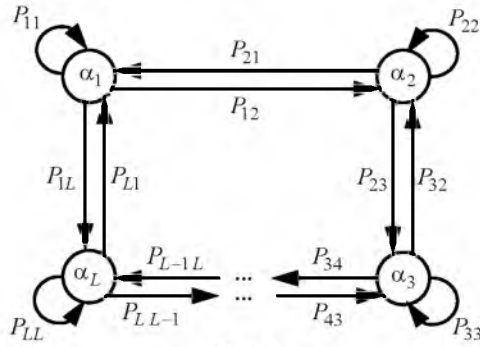


Рис. 3

представлен на рис. 3. Кругами на ней обозначены возможные (требуемые) состояния линии радиосвязи. Коэффициенты использования элементарных методов управления ресурсами радиолнии $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L$ определяют состояния линии радиосвязи. Вероятности $P_{11}, P_{12}, P_{21}, \dots, P_{jj}, P_{j-1j}, P_{jj-1}, \dots, P_{LL}$ ($j = \overline{1, L}$) – вероятности перехода из одного состояния в другое, значения которых могут быть рассчитаны на основе подходов к оценке показателей эффективности функционирования радиолнии [2], [3], [4], [13], [17].

Для описания функционирования системы на рис. 3 воспользуемся уравнениями Колмогорова [18]:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha_1}{dt} = P_{11}\alpha_1 - P_{12}\alpha_2 + P_{21}\alpha_1 - P_{1L}\alpha_L + P_{L1}\alpha_1; \\ \frac{d\alpha_2}{dt} = P_{22}\alpha_2 - P_{21}\alpha_1 + P_{12}\alpha_2 - P_{23}\alpha_2 + P_{32}\alpha_3; \\ \dots \end{cases} \quad (7)$$

Для решения системы (7) учтем, что при простейшем потоке воздействия

$$\sum_{j=1}^L \alpha_j = 1; \quad \sum_{j=1}^L \sum_{s=1}^L P_{js} = 1.$$

В качестве примера рассмотрим функционирование модели радиолнии при использовании трех элементарных методов управления (рис. 4).

Предположим, что

$$\begin{aligned} P_{11} &= P_{22} = P_{33} = \\ &= P_{12} = P_{21} = P_{23} = P_{32} = P_{31} = P_{13} = 1/9. \end{aligned}$$

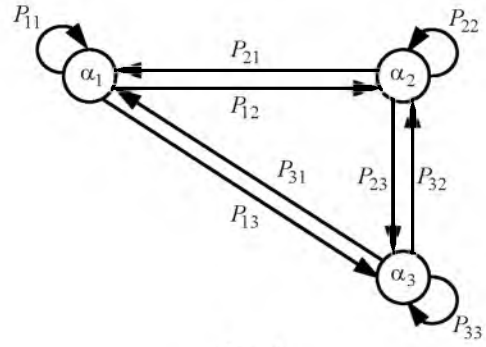


Рис. 4

Результаты моделирования с использованием предложенной методики показывают, что любой из трех элементарных методов задается коэффициентом использования равным нулю, два других – с коэффициентами $1/2$. Следовательно, один из методов может быть исключен из алгоритма функционирования радиолнии.

При

$$\begin{aligned} P_{11} &= P_{22} = P_{33} = 0; \\ P_{12} &= P_{21} = P_{23} = P_{32} = P_{31} = P_{13} = 1/6 \end{aligned}$$

получаем аналогичный результат. Причем данный алгоритм исключает возможность перехода модели в одно и то же состояние за одну итерацию.

При

$$\begin{aligned} P_{11} &= P_{22} = P_{33} = 0; \\ P_{12} &= 0.21; P_{21} = 0.34; P_{23} = 0.05; \\ P_{32} &= 0.05; P_{31} = 0.3; P_{13} = 0.05 \end{aligned}$$

получаем $\alpha_1 = 0.55; \alpha_2 = 0.41, \alpha_3 = 0.04$.

Таким образом, на основе теории случайных процессов предложена модель помехозащиты радиолнии при нестационарных параметрах внешнего воздействия, описываемого простейшим потоком. Метод требует соблюдения ограничений по потоку воздействия элементарных методов управления и необходимости задания переходных вероятностей модели. Достоинством метода является возможность управления функционированием модели радиолнии на основе построения графа функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев А. М., Абрамович А. В., Присяжнюк А. С. Концептуальные основы создания и развития автоматизированной системы управления ОАЦСС ВС РФ. // Информация и космос. 2016. № 2. С. 6–21.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. / пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. 1041 с.

3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигнала методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др.; под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
4. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей

псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др.; под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

5. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов / С. В. Дворников, С. С. Манаенко, С. С. Дворников, А. А. Погорелов // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 2. С. 140–143.

6. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. А. Русин, А. С. Дворников // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. № 2. С. 51–56.

7. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Бурыкин Д. А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информационная и космос. 2015. № 2. С. 4–7.

8. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 685–689.

9. Методика трансформации сигнального созвездия КАМ-16 с изменением его формы / А. Ю. Гужва, С. В. Дворников, А. А. Русин, А. В. Пшеничников // Электросвязь. 2015. № 2. С. 28–31.

10. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, С. С. Манаенко, Д. А. Бурыкин, Д. А. Кузнецов // Информационная и космос. 2015. № 3. С. 13–16.

11. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога / С. В. Дворников, А. А. Устинов, А. В. Пшеничников, В. В. Борисов, А. Г. Москалец, Д. А. Бурыкин // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2013. № 2. С. 90–97.

12. Дворников С. В., Манаенко С. С., Пшеничников А. В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 12, № 2. С. 87–93.

13. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.

14. Военные системы радиосвязи: в 2 ч. / под ред. В. В. Игнатова; ВАС. Л., 1989. Ч. I. 386 с.

15. Таха Х. Введение в исследование операций: в 2 кн. М.: Мир, 1985. Кн. 1. 479 с.; Кн. 2. 496 с.

16. Седякин М. Я. Элементы теории случайных импульсных потоков. М.: Сов. радио, 1965. 263 с.

17. Методика оценки вероятности битовой ошибки в каналах спутниковой связи при возмущении ионосферы / В. П. Пашинцев, М. Р. Бибарсов, С. С. Манаенко, Д. А. Потягов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 2. С. 62–68.

18. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962. 564 с.

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2016 г.

Для цитирования: Дворников С. В., Пшеничников А. В. Помехозащищенная модель радиосвязи в условиях динамического преднамеренного воздействия // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 16–22.

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук (2005), профессор (2011) кафедры радиосвязи Военной академии связи им. маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург). Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – техника радиосвязи; помехозащищенные радиосистемы; теория связи; статистическая радиотехника; цифровая обработка сигналов.

E-mail: practicsdv@yandex.ru

Пшеничников Александр Викторович – кандидат технических наук (2006), доцент (2013), докторант кафедры радиосвязи Военной академии связи им. маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – техника радиосвязи; помехозащищенные радиосистемы; теория связи.

E-mail: siracooz77@mail.ru

S. V. Dvornikov, A. V. Pshenichnikov
Military Academy of Communications (Saint Petersburg)

Noise Immunity Radio Link Model in Dynamic Intentional Exposure

Abstract. To ensure the required interference immunity of a radio link is a crucial task nowadays. The existing solutions in this field are based on signal spectrum spreading methods. In the age of radio engineering development application of specific technical solutions when building a noise immune radio system is ineffective. In this case, one of the most challenging tasks is taking into account the dynamic effects on the radio link resources. The solution to this problem can be obtained by the development of complex operation algorithms for radio system. This paper proposes noise immune radio link model taking into account the dynamic intentional impact on its resources. A distinctive feature of the proposed approach is determination of radio link resource control strategy. For that purpose, a concept of vector of elementary control methods is introduced. On the base of the random process theory a noise immunity radio link model is developed.

Key words: Noise Immunity, Control Method, Radio Model, Intentional Impact, Performance Evaluation

REFERENCES

1. Likhachev A. M., Abramovich A. V., Prisyazhnyuk A. S. Conceptual Foundations of Automated Control System Development for Integrated Data Communication Network of the Russian Federation Armed Forces. *Informatsiya i kosmos*, 2016, no. 2, pp. 6–21. (In Russian)
2. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital Communication. Theoretical foundations and practical application, Translated from English. 2nd edition]. Moscow, Izdatel'skii dom "Vil'yams", 2003, 1041 p. (In Russian)
3. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Mukhin N. P., Shestopalov V. I. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshi-reniem spektra signala metodom psevdosluchainoi pere-stroiki rabochei chastoty* [Interference Immunity of Radio Communication Systems with Signal Spectrum Spreading by Means of Operating Frequency Pseudo-Random Adjustment]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2000, 384 p. (In Russian)
4. V. I. Borisov, V. M. Zinchuk, A. E. Limarev, N. P. Mukhin, G. S. Nakhmanson *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshi-reniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu* [Interference Immunity of Radio Communication Systems with Signal Spectrum Spreading by Modulation of the Carrier by Pseudo-Random Sequence]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2003, 640 p. (In Russian)
5. Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S., Pogorelov A. A. Synthesis of Phase-Wave-Manipulated Wavelet Signals. *Informatsionnye tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 140–143. (In Russian)
6. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Enhancement of Noise Immunity of 16-QAM Signals with Transformed Constellations. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2014, no. 2, pp. 51–56. (In Russian)
7. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Burykin D. A. Structural and Functional Model of Signal Constellation with Increased Noise Immunity. *Informatsiya i kosmos*, 2015, no. 2, pp. 4–7. (In Russian)
8. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S. Noise Immunity Model of 16-QAM Signal with Transformed Constellation. *Informatsionnye tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 685–689. (In Russian)
9. Guzhva A. Yu., Dvornikov S. V., Rusin A. A., Pshenichnikov A. V. Shape Change Transformation Technique for 16-QAM Signal Constellation. *Elektrosvyaz'*, 2015, no. 2, pp. 28–31. (In Russian)
10. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S., Burykin D. A., Kuznetsov D. A. Theoretical Provisions for Increasing the Noise Stability of Signal-Code Constructions of Quadrature Signals. *Informatsiya i kosmos*, 2015, no. 3, pp. 13–16. (In Russian)
11. Dvornikov S. V., Ustinov A. A., Pshenichnikov A. V., Borisov V. V., Moskalets A. G., Burykin D. A. Demodulation of the PDSK Signals on the Basis of Adaptive Threshold. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2013, no. 2, pp. 90–97. (In Russian)
12. Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Pshenichnikov A. V. Spectral Effective Signals with Continuous Phase. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87–93. (In Russian)
13. Volkov L. N., Nemirovsky M. S., Shinakov Yu. S. *Sistemy tsifrovoy radiosvyazi: bazovye metody i kharakteristiki: ucheb. posobie* [Systems of Digital Radio Communication: Basic Methods and Characteristics: Study Guide]. Moscow, *Eko-Trendz*, 2005, 392 p. (In Russian)
14. Ignatov V. V. *Voennye sistemy radiosvyazi: v 2 ch.* [Military Radio Communication Systems: In Two Parts]. L., VAS, 1989, 386 p. (In Russian)
15. Takha Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsii: v 2-kh kn. Kn. 1, 2* [Introduction to Operation Study: In 2 Books. Book. 1, 2]. Moscow, *Mir*, 1985, 496 p. (In Russian)
16. Sedyakin M. Ya. *Elementy teorii sluchainykh impul'snykh potokov* [Random Impulse Flow Theory Elements]. Moscow, *Sov. radio*, 1965, 263 p. (In Russian)
17. Pashintsev V. P., Bibarsov M. R., Manaenko S. S., Potyagov D. A. Technique for Estimating Probability of Bit Error in Satellite Communication Channels During Ionospheric Disturbances. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossi. Radioelektronika*, 2012, no. 2, pp. 62–68. (In Russian)
18. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnostei* [Theory of Probability]. Moscow, *Fizmatiz*, 1962, 564 p. (In Russian)

Received December, 19, 2016

For citation: Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Noise Immunity Model Radio Line in a Dynamic Intentional Exposure. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 16–22. (In Russian)

Sergey V. Dvornikov – D.Sc. in Engineering (2005), Professor (2011) of the Department of Telecommunication at the Military Academy of Communications (Saint Petersburg). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: radio communication equipment; radio noise immunity; theory of communication; statistical radio engineering; digital signal processing.
E-mail: practcdsv@yandex.ru.

Alexander V. Pshenichnikov – Ph.D. in Engineering (2006), Associate Professor (2013), postdoctoral student of the Department of Telecommunication at the Military Academy of Communications (Saint Petersburg). The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: radio communication equipment; radio noise immunity; theory of communication.
E-mail: siracooz77@mail.ru